

## Спеціальні та комбіновані методи

УДК 622.765

**П.В. СЕРГЕЕВ**, канд. техн. наук  
(Украина, Донецк, Донецкий национальный технический университет)

**РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРЕДЕЛЫ РАСХОДА ФЛОКУЛЯНТА ПРИ СЕЛЕКТИВНОЙ ФЛОКУЛЯЦИИ УГЛЕЙ МАСЛАМИ**

Эффективность флотационного обогащения угольных шламов во многом определяется концентрацией в исходном питании тонкодисперсных частиц крупностью менее 30–50 мкм. При их повышенном содержании селективность разделения существенно снижается за счет значительных потерь органической массы с хвостами флотации [1].

Один из путей решения этой проблемы – применение технологий селективной флокуляции угольных шламов с использованием гидрофобных органических реагентов-флокулянтов [2]. В качестве последних чаще всего применяются синтетические латексы или масляные реагенты. Исследованиями установлено, что флокуляция масляными флокулянтами осуществляется в основном по пленочно-адгезионному [2], а латексами – по мостиковому механизму [3,4].

Независимо от природы флокулянта и механизма его флокулирующего действия важнейшим технологическим параметром процесса селективной флокуляции является его расход. В технической литературе приводятся многочисленные экспериментальные исследования этого параметра, носящие частный характер для того или иного вида сырья и не имеющие достаточного теоретического обоснования. Это не позволяет в полной мере раскрыть механизмы флокулообразования и правильно определить рациональные пределы этого параметра.

Исходя из вышесказанного цель данных исследований – теоретическая оценка рациональных пределов расхода масляных флокулянтов. При этом, во-первых, необходимо определить рациональную толщину пленки флокулянта на твердой поверхности, во-вторых, получить аналитическое выражение для удельной поверхности любого заданного класса крупности исходного материала и, в-третьих, вывести уравнение для расчета рационального предела расхода флокулянта.

Первую задачу выполним на основе анализа энергетического состояния пленки масляного флокулянта на угольной поверхности. В общем случае суммарная энергия разрыва адгезионной пленки флокулянта может быть представлена как сумма следующих слагаемых:

$$E_p = E_p^{ad} + E_p^{\kappa}, \quad (2)$$

где  $E_p^{ad}$  и  $E_p^k$  – соответственно, энергия адгезионного и когезионного разрыва пленок флокулянта.

С учетом лиофобно-лиофильной гетерогенности (мозаичности) угольной поверхности и допуская наличие адгезионного разрыва на лиофобных участках и когезионного на лиофильных, для  $E_p^{ad}$  и  $E_p^k$  можно записать:

$$E_p^{ad} = \sigma_{фг} \cdot (1 + \cos \theta) \cdot S_{лфо} ; \quad (3)$$

$$E_p^k = 2 \cdot \sigma_{фг} \cdot S_{лфи} , \quad (4)$$

где  $\sigma_{фг}$  – поверхностное натяжение на границе "флокулянт – газ";  $\theta$  – краевой угол смачивания твердой поверхности флокулянтом;  $S_{лфо}$  и  $S_{лфи}$  – соответственно, площади лиофобных и лиофильных участков на твердой поверхности.

Подставляя выражения (3) и (4) в уравнение (2), получим

$$E_p = \sigma_{фг} \cdot (1 + \cos \theta) \cdot S_{лфо} + 2 \cdot \sigma_{фг} \cdot S_{лфи} . \quad (5)$$

Практическую ценность представляет удельная величина  $E_{py}$  на единицу массы флокулянта  $m_{фл}$  на твердой поверхности. Введем коэффициент лиофобности поверхности

$$K_l = \frac{S_{лфо}}{S_{общ}} ,$$

где  $S_{общ} = S_{лфо} + S_{лфи}$ .

Тогда с учетом того, что  $m_{фл} = \rho_{фл} \cdot S_{общ} \cdot h_{нл}$ , где  $\rho_{фл}$  – плотность флокулянта;  $h_{нл}$  – толщина пленки флокулянта на твердой поверхности, после преобразований запишем

$$E_{py} = \frac{(1 + \cos \theta) \cdot K_l \cdot \sigma_{фг}}{\rho_{фл} \cdot h_{нл}} + \frac{2 \cdot \sigma_{фг}}{\rho_{фл} \cdot h_{нл}} \cdot (1 - K_l) . \quad (6)$$

Проанализируем полученное выражение для случая селективной флокуляции тонкодисперсных углей из водоугольных суспензий аполярным реагентом – керосином. Исходя из физико-химических характеристик керосина, а также,

учитывая нормальные условия проведения экспериментов, примем:  $\sigma_{\phi\kappa} = 30$  мН/м;  $\Theta = 0 - 90^\circ$ ;  $\rho_{\phi\lambda} = 800$  кг/м<sup>3</sup>;  $h_{nl} = 50 - 1000$  нм.

С помощью программы MathCAD получены графики зависимостей  $E_{py}(K_n) \mid h_{nl} = var$  и  $E_{py}(h_{nl}) \mid \theta = var$ .

Как видно из рис.1, лиофобно-лиофильный баланс угольной поверхности влияет на  $E_{py}$  только в области малых значений  $h_{nl}$  (до 50–100 нм). При больших значениях  $h_{nl}$  энергия разрыва  $E_{py}$  фактически не изменяется, так как в "толстых" пленках флокулянта практически не ощущается энергетическое воздействие твердой поверхности.

Кривая  $E_{py}(h_{nl})$  имеет гиперболическую форму с перегибом в области  $h_{nl} = 50-200$  нм (рис.2). При этом влияние краевого угла смачивания  $\Theta$  незначительно, а область перегиба можно считать критической, поскольку дальнейшее увеличение толщины пленки флокулянта практически не сказывается на величине энергии разрыва  $E_{py}$ . Следовательно, рациональные пределы расхода масла должны обеспечивать толщину пленки флокулянта на угольной поверхности не более 50–200 нм. Исходя из этого положения найдем аналитическое выражение для расчета удельного расхода масляного флокулянта  $Q_{\phi\lambda}$  и его рациональных пределов.

Масса флокулянта, закрепившегося на твердой поверхности, может быть определена как

$$m_{\phi\lambda} = \rho_{\phi\lambda} \cdot K_n \cdot S_o \cdot h_{nl},$$

где  $K_n$  –коэффициент(степень) покрытия угольной поверхности флокулянтном, д.е.;  $S_o$  – суммарная поверхность угольных частиц, м<sup>2</sup>. Отсюда можем записать, что

$$S_o = \frac{m_{\phi\lambda}}{\rho_{\phi\lambda} \cdot K_n \cdot h_{nl}}.$$

С другой стороны,  $S_o = S_{y\partial} \cdot m_{y\partial}$ , где  $S_{y\partial}$  и  $m_{y\partial}$  –удельная поверхность и масса флокулируемого угля, соответственно. Тогда с учетом этого имеем:

$$S_{y\partial} \cdot m_{y\partial} = \frac{m_{\phi\lambda}}{\rho_{\phi\lambda} \cdot K_n \cdot h_{nl}}$$

Разделим обе части уравнения на  $m_{y\partial}$ :

$$S_{y\partial} = \frac{Q_{\phi\lambda}}{\rho_{\phi\lambda} \cdot K_n \cdot h_{n\lambda}},$$

где  $Q_{\phi\lambda} = m_{\phi\lambda} / m_{y\partial}$ ,

и получим

$$Q_{\phi\lambda} = S_{y\partial} \cdot \rho_{\phi\lambda} \cdot K_n \cdot h_{n\lambda} . \quad (7)$$

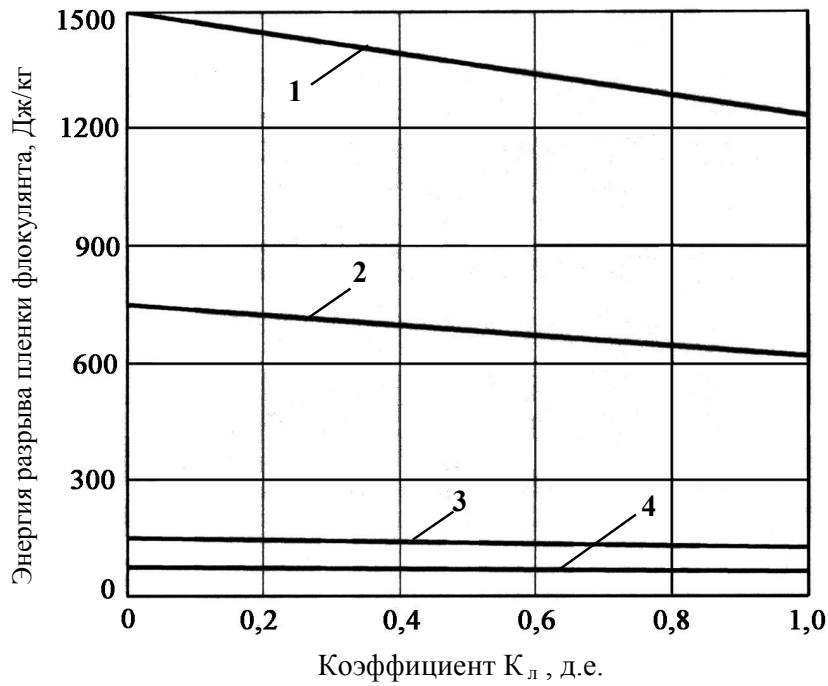


Рис.1 Зависимость энергии разрыва пленки масляного флокулянта от коэффициента лиофобности ( $K_{л}$ ) при различных значениях толщины пленки ( $h_{пл}$ ): 1-50 нм; 2- 100 нм; 3- 500 нм; 4- 1000 нм.

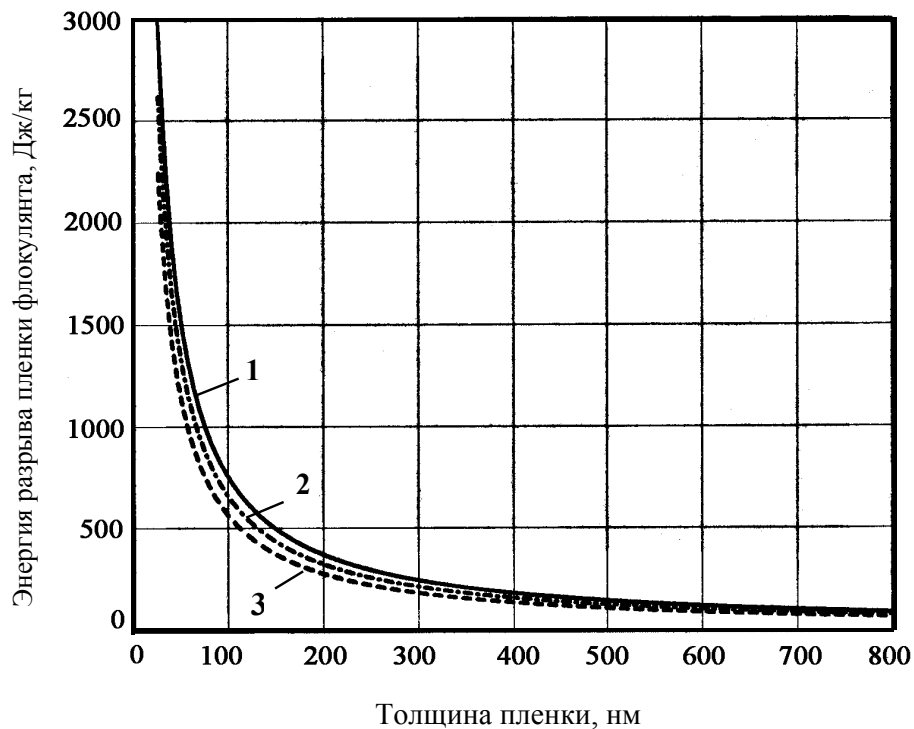


Рис.2 Зависимость энергии разрыва пленки масляного флокулянта от ее толщины ( $h_{пл}$ ) при различных значениях краевого угла смачивания ( $\Theta$ ): 1-0°; 2- 60°; 3- 90°.

Рис. 1. Зависимость энергии разрыва пленки масляного флокулянта от коэффициента лиофобности  $K_{\text{л}}$  при различных значениях толщины пленки  $h_{\text{пл}}$ :  
1 – 50; 2 – 100; 3 – 500; 4– 1000 нм

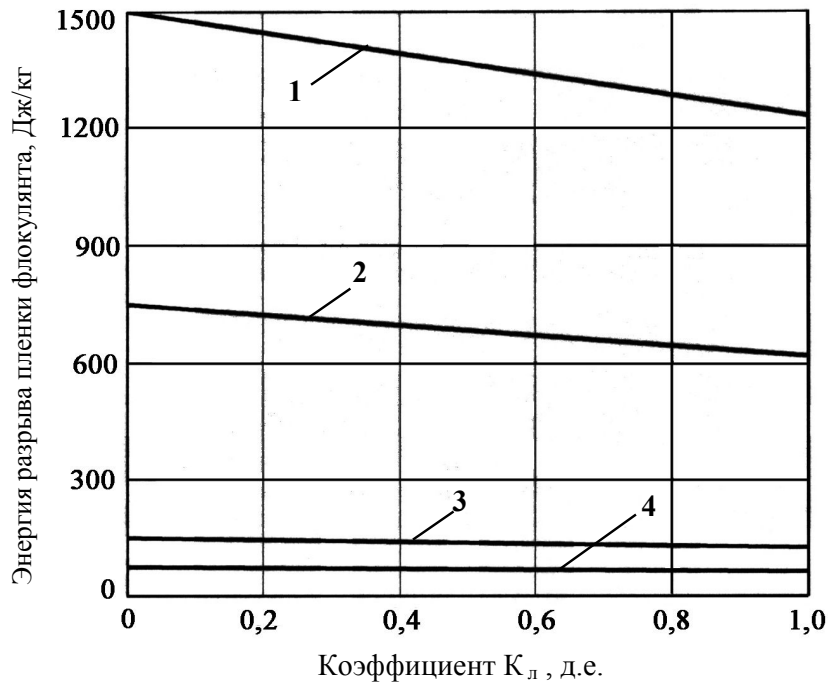


Рис.1 Зависимость энергии разрыва пленки масляного флокулянта от коэффициента лиофобности ( $K_{л}$ ) при различных значениях толщины пленки ( $h_{пл}$ ): 1-50 нм; 2- 100 нм; 3- 500 нм; 4- 1000 нм.

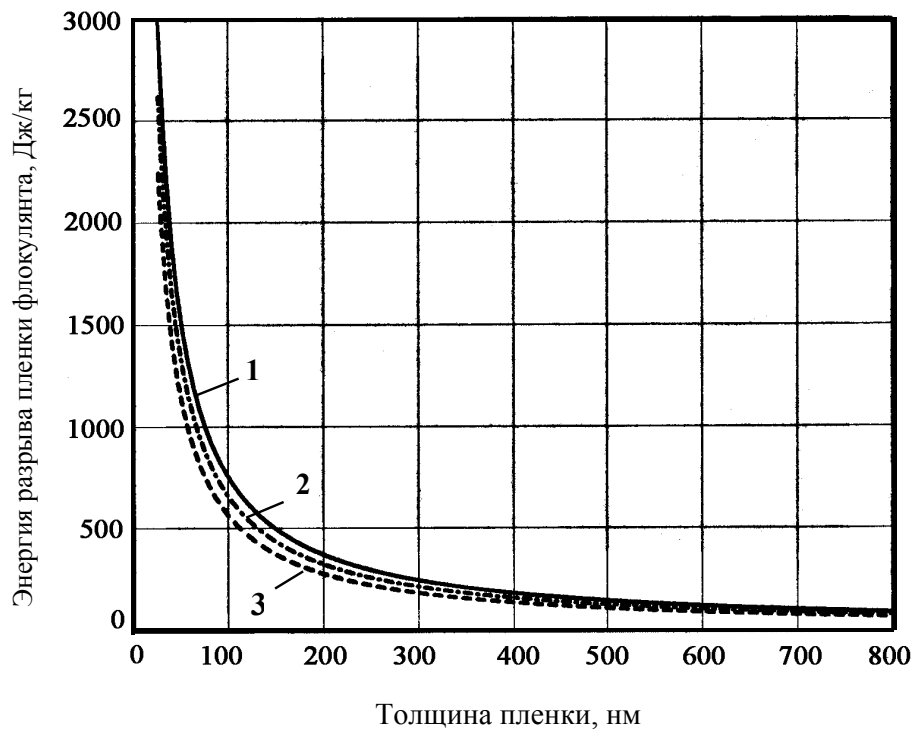


Рис.2 Зависимость энергии разрыва пленки масляного флокулянта от ее толщины ( $h_{пл}$ ) при различных значениях краевого угла смачивания ( $\Theta$ ): 1-0°; 2- 60°; 3- 90°.

Рис. 2. Зависимость энергии разрыва пленки масляного флокулянта от ее толщины  $h_{пл}$  при различных значениях краевого угла смачивания  $\Theta$ : 1 – 0; 2 – 60; 3 – 90°

Для определения  $S_{y\partial}$  воспользуемся известным уравнением суммарной характеристики крупности Розина-Раммлера. Как отмечается в работах [5,6], оно наиболее приемлемо для оценки распределения по крупности дробленых продуктов – сливов мельниц, классификаторов, в том числе различных шламовых материалов.

Уравнение суммарной характеристики крупности Розина-Раммлера "по минусу" имеет вид:

$$R^- = 1 - e^{-b \cdot x^n},$$

где  $R^-$  – выход зерен меньше диаметра  $x$ . Тогда выход элементарного класса крупностью от  $x$  до  $x + dx$

$$dR^- = (1 - e^{-b \cdot x^n})' dx.$$

В единице массы материала плотностью  $\rho_{yz}$  объем элементарного класса

$$\frac{dR^-}{\rho_{yz}} = \frac{(1 - e^{-b \cdot x^n})' dx}{\rho_{yz}}.$$

Для зерна кубической формы объем равен  $x^3$ , а поверхность –  $6x^2$ . Тогда

число зерен в элементарном классе  $dN = \frac{dR^-}{\rho_{yz} \cdot x^3}$ , а поверхность

$$dS = \frac{6x^2 \cdot dR^-}{\rho_{yz} \cdot x^3} = \frac{6 \cdot dR^-}{\rho_{yz} \cdot x}.$$

Удельная поверхность зерен в классе крупнее  $x_1$  и мельче  $x_2$

$$S_{y\partial} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{6}{\rho_{yz}} \cdot \frac{(1 - e^{-b \cdot x^n})' dx}{x} = \frac{6 \cdot 10^6 \cdot b \cdot n}{\rho_{yz}} \int_{x_1}^{x_2} x^{(n-2)} \cdot \exp(-b \cdot x^n) dx. \quad (8)$$



Подставив выражение (8) в уравнение (7), получим

$$Q_{\text{фл}} = \frac{6 \cdot 10^6 \cdot \rho_{\text{фл}} \cdot K_n \cdot h_{\text{нл}} \cdot b \cdot n}{\rho_{\text{уг}}} \cdot \int_{x_1}^{x_2} x^{(n-2)} \cdot \exp(-b \cdot x^n) dx. \quad (9)$$

Как видим, выражение (9) содержит сомножитель в виде определенного интеграла с подинтегральной функцией, не имеющей стандартного решения. Решение этого интеграла в символьном виде в программе MathCAD возможно только для  $n=1$ , т.е. в случае материалов, суммарные характеристики которых – прямые линии на двойной логарифмической сетке с углом наклона  $\alpha \approx 45^\circ$ . Поэтому наиболее приемлемым представляется решение указанного интеграла в отмеченной программе в численном виде.

На основании анализа выражения (9) можно сделать вывод, что рациональный предел расхода масляного флокулянта прямо пропорционален плотности флокулянта  $\rho_{\text{фл}}$ , толщине его пленки на твердой поверхности  $h_{\text{нл}}$ , степени покрытия флокулянтом этой поверхности  $K_n$  и обратно пропорционален плотности твердой фазы  $\rho_{\text{уг}}$ . Кроме того, этот предел возрастает по мере увеличения содержания в твердом материале частиц крупностью менее 1 мкм и уменьшения крупности материала в целом, т.е. по мере роста параметров  $b$  и  $n$  уравнения Розина-Раммлера, соответственно.

Расчеты, выполненные в программе MathCAD для случая селективной флокуляции керосином угольного шлама крупностью менее 100 мкм и зольностью 27,2%, показывают, что при степени покрытия поверхности флокулянтом 10%, толщине пленки флокулянта 200 нм и его плотности около 1000 кг/м<sup>3</sup> рациональный предел расхода флокулянта составляет 1,18%.

Экспериментальные исследования по селективной флокуляции этого материала в лабораторных условиях дают рациональный предел расхода флокулянта на уровне 1–1,25%.

Таким образом, близость экспериментальных и расчетных значений параметра  $Q_{\text{фл}}$  позволяет сделать вывод о возможности использования полученного аналитического выражения как для теоретической, так и практической оценки рациональных пределов расхода флокулянтов при селективной флокуляции углей маслами.

#### Список литературы

1. Гаркушин Ю.К., Сергеев П.В., Білецький В.С. Стан та перспективи переробки вугільних шлаків // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2003. – Вип.17(58). – С.143–149.
2. Сергеев П.В., Білецький В.С. Селективна флокуляція вугілля. – Донецьк: ДонДТУ,

1999. – 136 с.

3. Нікітін І.М., Сергєєв П.В., Білецький В.С. Селективна флокуляція вугільних шламів латексами. – Донецьк: ДонДТУ, 2001. – 152 с.

4. Никитин И.Н. Разработка флокуляционно-флотационного способа обогащения угольных шламов с применением латексного флокулянта: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Люберцы: ИОТТ, 1986. – 16 с.

5. Перов В.А., Андреев Е.Е., Биленко Л.Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1990. – 301 с.

6. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы. – М.: Недра, 1982. – 366 с.

© Сергєєв П.В., 2005

*Надійшла до редколегії 26.04.2005 р.*

*Рекомендовано до публікації д.т.н. О.І. Назимко*

УДК 622.794

**А.Н. КОРЧЕВСКИЙ**

(Украина, Донецк, Донецкий национальный технический университет)

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУХОЙ СЕПАРАЦИИ МАТЕРИАЛОВ. НАСТРОЙКА МОДЕЛИ**

В отечественной и, особенно, зарубежной практике наблюдается тенденция использования пневматических методов для разделения сыпучих материалов. Разделяемые зерна имеют разную форму, плотность, коэффициент трения и другие свойства, на различии которых и основан упомянутый выше метод, привлекающий внимание многих специалистов [1-3]. Для этих целей применяются в основном сухие методы разделения и пневматические сепараторы различных конструкций [4].

Исследования направлены на изыскание новых способов разделения сыпучих материалов по указанным признакам и создание новых наиболее эффективных машин. Проведенный анализ в этой области позволил выделить следующие группы машин: вибрационные, пневматические, пневмовибрационные, ферромагнитные.

В вибрационных сепараторах разделение сыпучей смеси происходит под действием вибрации за счет разницы в шероховатости частиц, что вызывает их перемещение по различным траекториям. Недостатком такого типа машин является низкое качество сепарации, обусловленное движением материала в общем потоке, и малая производительность.

В пневматических сепараторах материал разделяется за счет различной траектории движения зерен в воздушном потоке. К их недостаткам следует отнести низкую эффективность разделения, малую производительность,

сложность настройки и регулирования в процессе разделения.

Пневмовибрационные сепараторы можно разделить на проточные и противоточные, которые представляют особый интерес. Здесь под действием вибрации и восходящего потока воздуха частицы переходят в псевдооживленное состояние и расслаиваются по высоте слоя на тяжелую и легкую фракции.

В семидесятые годы прошлого века в отечественной практике применялись пневмовибрационные сепараторы типа СП-12, СП-6, СПБ-100М, которые относятся к машинам проточного действия [5].

В зарубежной практике для сухого обогащения применяются сепараторы "Super Air Flo" (США) и сепараторы фирм "Ведаг" и "Гумбольдт" (Европа) [6]. К недостаткам этих машин можно отнести низкую эффективность разделения зерен из-за взаимного засорения продуктов, которое вызвано движением материала к месту разгрузки в общем потоке. Противоточные сепараторы обеспечивают более высокую точность разделения по сравнению с проточными.

Процессы распределения частиц твердой фазы при пневмовибрационной сепарации представляют большую трудность для исследования, так как они динамичны, находятся под влиянием большого количества факторов и происходят в маленьком масштабе. Одним из вариантов разрешения этой проблемы является численное моделирование, которое сочетает в себе динамику, точность и рассмотрение широкого спектра деталей [7]. Разработана компьютерная модель для моделирования кинетики взаимодействия фаз, которая базируется на дискретных элементах [8].

Целью настоящей работы является моделирование гравитационной сепарации многокомпонентного лома цветных металлов с использованием компьютерного моделирования пневмовибрационного метода.

Рассмотрим пару минеральных частиц, схема взаимодействия которых представлена на рис. 1.

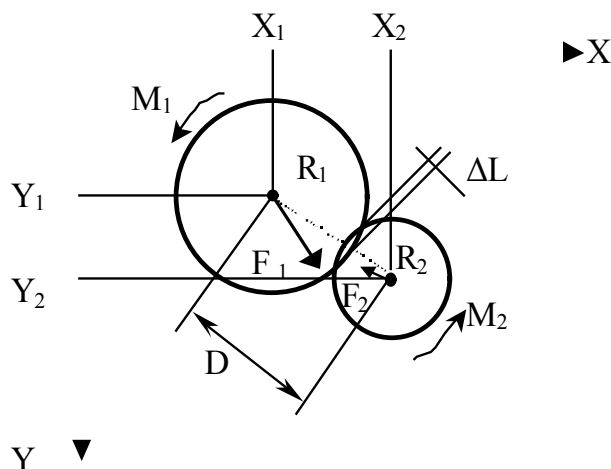


Рис. 1. Схема взаимодействия пары минеральных частиц

Частицы имеют шарообразную форму с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ . Любая частица движется под действием силы  $F_1$  или  $F_2$  и вращается в соответствии с законом Ньютона в прямоугольной системе координат  $X$ - $Y$ , если она ускоряется моментами  $M_1$  и  $M_2$ . Движение частиц рассматривается в дискретные периоды времени. В компьютерной реализации эти периоды моделируются как циклы. Координаты центров тяжести ( $X_1$ ,  $Y_1$  и  $X_2$ ,  $Y_2$ ), скорости ( $V_1$  и  $V_2$ ) и силы являются постоянными и рассчитываются на каждом цикле. Все частицы движутся под действием результирующего ускорения  $G$ , возникающего от действия сил тяжести, Архимедовой (расположения) силы, демпфирующей силы или силы сопротивления среды, а также от влияния смежных соседей [9, 10]. В результате приращение скорости на каждом цикле, м/с:

$$\Delta V = G \cdot \Delta t - k_V \cdot V_y, \quad (1)$$

где  $G$  – ускорение, м/с<sup>2</sup>;  $\Delta t$  – время приращения на цикле, с;  $k_V$  – сопротивление среды (коэффициент демпфирования).

Затем частицы движутся к следующей позиции, соответственно, приращению компонентов скорости и времени:

$$X = X + \Delta V_x \cdot \Delta t, \quad (2)$$

$$Y = Y + \Delta V_y \cdot \Delta t. \quad (3)$$

Здесь  $X$  и  $Y$  – новые горизонтальные и вертикальные координаты частицы, м;  $\Delta V_x$  и  $\Delta V_y$  – приращения горизонтальной и вертикальной скорости, м/с.

После перемещения частицы за один цикл в новое положение расстояние  $D$  между смежными частицами должно быть изменено и нахлестка  $\Delta L$  рассчитывается. Затем приращение силы, Н:

$$\Delta F = k \cdot \Delta l - k_F \cdot V - k_T \cdot F, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент жесткости, Н/м;  $k_T$  и  $k_F$  – коэффициент трения и коэффициент необратимости (потери энергии в течение взаимодействия);  $F$  – результирующая сила, Н.

В течение каждого цикла смежные частицы проверяются на условия когезии и адгезии. Если частицы приближаются на критическое расстояние, то они слипаются между собой (две или несколько), образуя комплекс.

Одновременно проверяются силы адгезии (когезии). Если они достигают определенных пределов, слипшиеся комплексы разрушаются. Введено три предела для сил, а именно: слипшиеся частицы должны разъединиться, если они были сжаты в нормальном направлении на величину большую, чем предел сжатия  $L_t$ , или были срезаны в тангенциальном направлении относительно друг друга больше, чем предел сдвига  $L_s$ , или изогнуты относительно соединения более чем предел коробления  $L_b$ .

Модель позволяет получить правдивое динамическое поведение частиц и исследовать влияние различных параметров при обогащении и обезвоживании. Компьютерные коды развиты в среде Дельфи 3. Моделирование поведения группы зерен, состоящей из сотни взаимодействующих между собой частиц, в течение сотен тысяч циклов может быть закончено за приемлемый период времени благодаря средствам объектного программирования. В результате работы программы можно получить графические и текстовые файлы для анализа.

Для описания свойств частиц и параметров их взаимодействия вводятся следующие величины: плотность материала частиц; горизонтальное ускорение; вертикальное ускорение; угловое (крутящее) ускорение; коэффициент трения; коэффициент вязкостного сопротивления (внешнего и внутреннего); коэффициент крутящего сопротивления (внешнего и внутреннего); коэффициент нормальной жесткости; коэффициент касательной жесткости; коэффициент изгибной жесткости; режим контактирования частиц; режим адгезии частиц; дистанция, при которой уже возможно адгезионное взаимодействие.

В лаборатории кафедры обогащение полезных ископаемых Донецкого национального технического университета разработана конструкция лабораторного пневмовибрационного сепаратора с противоточным движением продуктов разделения [11]. Принципиальная схема сепаратора и анализ сил, действующих на частицы материала, приведены в работе [12]. В ходе натурных экспериментов была подготовлена проба дробленого лома цветных металлов крупностью 1,25–5 мм [11]. В состав дробленого лома цветных металлов входит алюминий и резиновая изоляция плотностью 2,72 и 1,2 т/м<sup>3</sup>, соответственно. Результаты фракционного анализа исходного материала свидетельствуют о том, что содержание алюминия составляет 82,7, а резиновой изоляции 17,3%.

Для детального исследования процесса сепарации использована упомянутая выше модель на базе дискретных элементов. Первоначальное состояние модели показано на рис. 2.

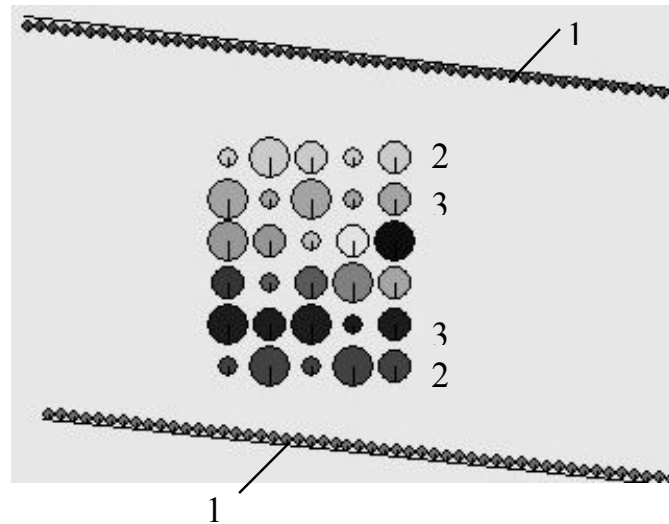


Рис. 2. Исходное состояние модели перед началом моделирования:  
1 – стенки сепаратора; 2 – слой частиц из резины; 3 – слой частиц из алюминия  
(в средних слоях частицы резины и алюминия расположены случайным образом)

В модели учтены свойства разделяемых материалов и задано их примерное количественное соотношение. Кроме того, стенки сепаратора имеют характерные для них свойства и режим движения, а также угол и направление наклона. Подача воздуха снизу учтена путем задания соответствующей скорости частиц. На рис. 3 изображено промежуточное положение разделяемых частиц по истечении 2 000 000 циклов счета. Один цикл времени счета в модели соответствует  $5 \times 10^{-6}$  с натурального времени.

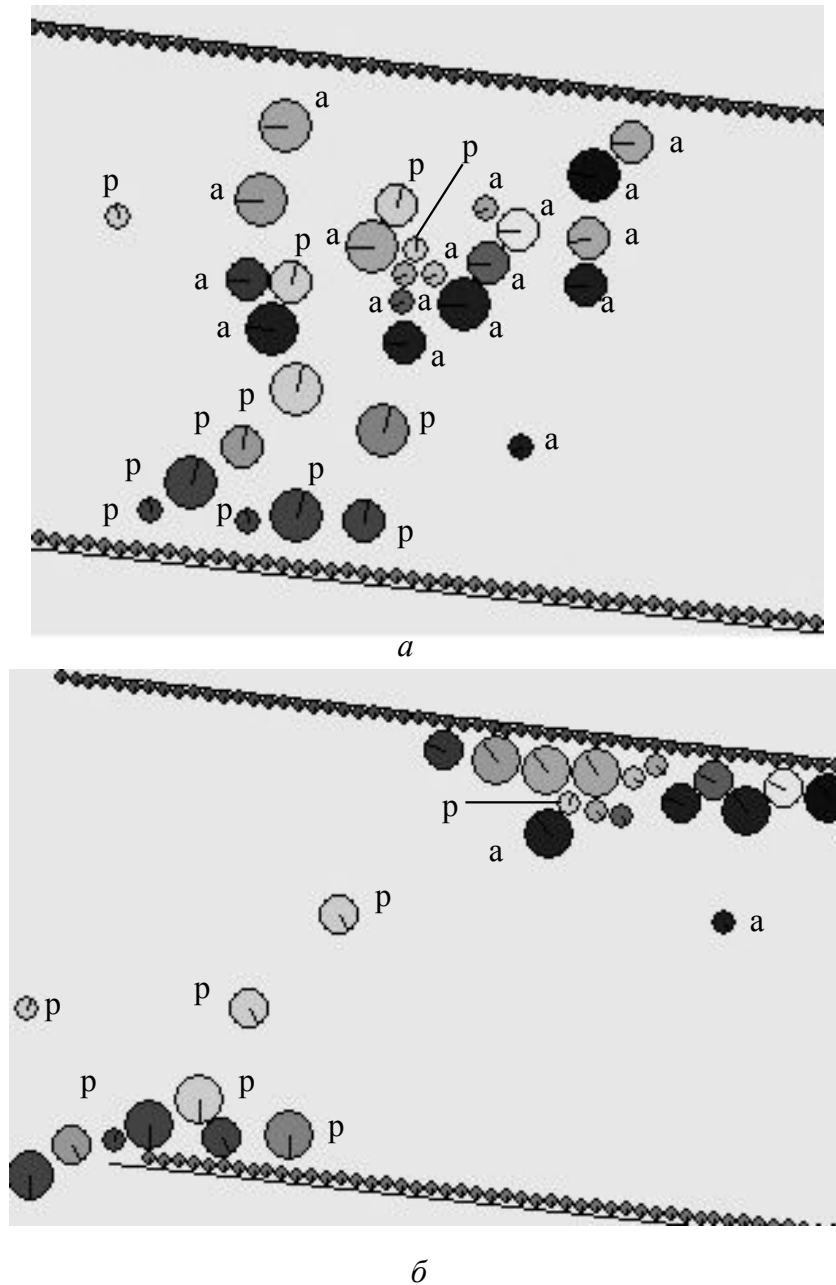


Рис. 3. Графическое представление результатов моделирования по истечении 800 000 (а) и 2 000 000 (б) циклов счета, а – частицы алюминия, р – резины

Как следует из представленных графических фрагментов, частицы не только витают в потоке воздуха, но и вращаются, сталкиваясь друг с другом и стенками сепаратора, что видно по изменению положения их радиуса.

В ходе моделирования отдельные зерна помечены цветом и имеют индивидуальный номер. При наведении курсора на частицу на дисплее высвечивается ее номер, соответствующий номеру в файле исходных данных.

Кроме того, в текстовом файле указываются координаты центра тяжести каждого зерна, по которым можно определить его местоположение в данный момент времени и траекторию движения. Поэтому моделирование с использованием дискретных элементов позволяет анализировать тонкие процессы взаимодействия частиц при разных режимах скоростей подачи воздуха и вибрации стенок сепаратора, которые происходят в очень маленькие промежутки времени.

В ходе анализа можно определить, что на цикле счета 800 000 процесс разделения материала еще не закончился, т.к. часть зерен резины увлечена частицами алюминия (см. рис. 3, а).

На цикле счета 2 000 000 от начала эксперимента, процесс разделения фактически завершился. Среди зерен алюминия осталась увлеченная и защемленная ними при движении частица резины, которая не попала в тяжелый продукт – отходы. Эта частица маленького диаметра загрязняет концентрат, разгружающийся через порог в правой части верхней стенки сепаратора. Одна мелкая частица алюминия в правой части объема сепаратора и две средних размеров частицы резины еще движутся в его средней части (см. рис. 3, б), но в целом процесс уже закончился.

Результаты некоторых натурных экспериментов – состав и качество концентрата (см таблицу) подтверждают высокую селективность разделения зерен в лабораторном пневмовибрационном сепараторе при выбранном на основании предварительного компьютерного моделирования режиме.

*Таблица*

Опыт	Выход, %	Содержание, %		Извлечение алюминия, %	Эффективность, %
		алюминия	резины		
1	83,82	98,15	0,85	99,43	90,1
2	82,88	99,3	0,7	99,26	94,5
3	80,99	98,14	1,86	99,46	96
4	81,87	99,5	0,5	96,45	97,4
5	82,07	98,71	1,29	97,91	97,7

Из приведенных данных следует, что моделирование сложных процессов сепарации материалов с использованием метода дискретных элементов позволяет исследовать тонкие процессы взаимодействия зерен за малые промежутки времени и прогнозировать результаты разделения.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение взаимодействия зерен в процессах обогащения.

#### **Список литературы**

1. Новая технология сухого обогащения // Российский уголь. – 2003. – №1. – С. 28-29.



2. Отработка технологии для индивидуальных обогащательных установок / Анисимов Н.Т., Голубничий В.Г., Багмут З.В., Сологуб В.В. // Уголь Украины. – 2003. – №3. – С. 40–41.
3. **Кофанов А.С., Чумак В.Ф., Уманец А.С., Ефремов Ю.И.** Обогащение полезных ископаемых пневмовибрационным способом // Збагачення корисних копалин: Науч.-техн. зб. – 2003. – С. 96–101.
4. **Анохин В.Д., Плинс Д.А., Монахов В.Н.** Вибрационные сепараторы. – М.: Недра, 1991. – 156 с.
5. Оборудование для обогащения угля: Спр. пособие / Под ред Б.Ф. Братченко. М.: Недра, 1979. – 335 с.
6. **Берт Р.О.** Технология гравитационного обогащения. – М.: Недра. – 1990. – 574 с.
7. **Cundall P.A., Strack O.D.L.** A discrete numerical Model for granular assemblies, *Geotechnique*, 29, # 1, pp. 47-65 (1974).
8. **Звягильский Е.Л.** Изучение кинетики обрушения толщи над горизонтальными выработками мелкого заложения // Проблемы горного давления. – 1999. – № 2. – С. 17–29.
9. **Гарковенко Е.Е., Назимко Е.И., Самойлов А.И., Папушин Ю.Л.** Особенности флотации и обезвоживания тонкодисперсных углесодержащих материалов. – Донецк: Норд-Пресс, 2002. – 266 с.
10. **Назимко Е.И., Друц И.Н.** Исследование кинетики взаимодействия фаз в динамической среде при обогащении минералов. // Горный информационно-аналитический бюл. – 2004. – №1. – С. 336–339.
11. Исследовать возможность гравитационной сепарации многокомпонентного лома с применением вибро-пневматического метода: Отче о НИР; Рук. Сухин Н.В. – Х/т № 86–82. № Гр. 01860030623, И. № 02870067323. – Донецк, 1987. – 150 с.
12. **Сухин Н.В., Корчевский А.Н., Назимко Е.И.** Применение вибрационного пневматического сепаратора при разделении лома цветных металлов // Обогащение полезных ископаемых: Наук.-техн. зб. – 2004. – Вип. 20 (61). – С. 77-82.

© Корчевский А.Н., 2005

*Надійшла до редколегії 20.04.2005 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. О.Д. Полуляхом*

УДК 622.765.2

**В.С. БІЛЕЦЬКИЙ**, д-р техн. наук,

**П.В. СЕРГЄЄВ**, канд. техн. наук,

**Ю.О. ПРОТАСОВ**

(Україна, Донецьк, Донецький національний технічний університет)

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБАГАЧЕННЯ ВУГІЛЬНИХ ШЛАМІВ СЕЛЕКТИВНОЮ ФЛОКУЛЯЦІЄЮ В УМОВАХ ГІДРОТРАНСПОРТУ**

Актуальною проблемою сучасного вуглезбагачення є ефективна переробка шламів мулонакопичувачів і шламовідстійників. При вуглезбагачувальних

фабриках України знаходяться 35 мулонакопичувачів загальним об'ємом 129 млн куб. м, які містять 114 млн т шламів, переважно відходів флотації зольністю 45–75% [1].

Для переробки лежалих шламів використовують гравітаційні методи збагачення (гідросайзер, гвинтові сепаратори тощо). Разом з тим, недоліком гравітаційних технологій переобки є їх низька ефективність на класах  $-0,1$  мм. Це робить актуальним пошук і впровадження комплексних технологій збагачення шламів включно з тонкими класами.

Нами пропонується для збагачення вугілля кл.  $-0,1$  мм застосовувати технологію селективної масляної агрегації [2]. Але її вузьким місцем є відносно великі витрати аполярних реагентів, що суттєво обмежує можливість використання цієї технології для енергетичного вугілля. Доцільніше застосування селективної масляної агрегації для коксівного вугілля з використанням в якості реагенту продуктів коксохімічного виробництва (які у цьому випадку повертаються у процес коксування разом з вугіллям).

Для реалізації процесу селективної масляної агрегації використовують різноманітні мішалки [3], але водночас процес може відбуватися у будь-якому турбулентному потоці води, наприклад, під час гідравлічного транспортування вугільних шламів з мулонакопичувача до вуглепідготовчого цеху коксохімзаводу.

Мета цієї роботи – дослідження суміщеного процесу "Селективна масляна агрегація – гідротранспорт вугілля" методом планового експерименту з одержанням регресійної моделі процесу.

Суть дослідження полягала у виявленні характеру залежності зольності концентрату селективної масляної агрегації від трьох факторів: витрат реагенту ( $X_1$ ), дальності гідравлічного транспортування водо-вугільно-реагентної суміші ( $X_2$ ) та її концентрації ( $X_3$ ). Схема експерименту: підготовка водо-вугільної суміші до гідротранспорту, добавка реагента згідно плану експеримента, гідравлічне транспортування суміші на стенді при швидкості  $V = 1,1V_{кр}$ , зневоднення вугільного шламу на відсаджувальній центрифугі при  $Fr = 1000$ . Кек центрифуги являє собою концентрат процесу селективної масляної агрегації, а твердий осад фугату – відходи. Застосовувалися стенди НВО "Хаймек" та обладнання кафедри "Збагачення корисних копалин" Донецького національного технічного університету. Як вихідний матеріал взято шлами мулонакопичувача Ясинівського КХЗ, збагачений гвинтовою сепарацією до зольності 30%. Крупність шламів складала 3–0 мм, вміст кл.  $-0,1$  мм – 26%.

Для планування експерименту вибрано некомпозиційний трирівневий план Бокса-Бенкена для трьох факторів, який згідно [4] за своїми характеристиками переважає центрально-композиційний план.

Фактори та границі їх варіювання наведені в таблиці 1.

## Спеціальні та комбіновані методи

Фактор	Код фактора	Одиниця вимірювань	Рівні факторів		
			-1	0	+1
Витрати реагента	X <sub>1</sub>	мас. %	0,5	1,5	2,5
Дальність транспортування	X <sub>2</sub>	м	600	3000	5400
Концентрація гідросуміші	X <sub>3</sub>	мас. %	10	30	50

*Таблиця 1*

Обробка результатів експерименту здійснювалася за комп'ютерною програмою "Statgraphics".

Аналіз значущості коефіцієнтів моделі виконано на основі Паретто-графіка (рис.1а). Як видно, значущими є коефіцієнти при X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub>, при квадратичному члені X<sub>1</sub><sup>2</sup> та члені, що відображає парну взаємодію X<sub>1</sub>X<sub>3</sub>. Ці коефіцієнти знаходяться праворуч вертикальної лінії на Паретто-графіку, що відповідає 95% значущості.

З урахуванням значущості коефіцієнти рівняння регресії має вигляд:

$$\text{Ash} = 15,4667 - 3,8625 \cdot X_1 - 1,4375 \cdot X_2 - 1,625 \cdot X_3 + 2,46667 \cdot X_1^2 - 0,475 \cdot X_1 \cdot X_3$$

Адекватність моделі в цілому підтверджується високим значенням коефіцієнта детермінації R-кв = 99,53% і тим, що критерій Lack-of-fit (втрати узгодженості функцій) складає 0,0804, що перевищує критичне значення (0,05). На рис. 1б показана відповідність експериментальних даних (observed) і розрахункових (predicted). На рис. 2 подані тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції та їх контурні криві (лінії рівня).

Гіперповерхні мають неекстремальний характер. Як видно з рис. 1 і 2, зростання кожного з факторів (X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub>) призводить до покращення якості концентрату (зниження його зольності), але найбільш впливає на зольність концентрату селективної масляної агрегації фактор X<sub>1</sub> – витрати реагенту.

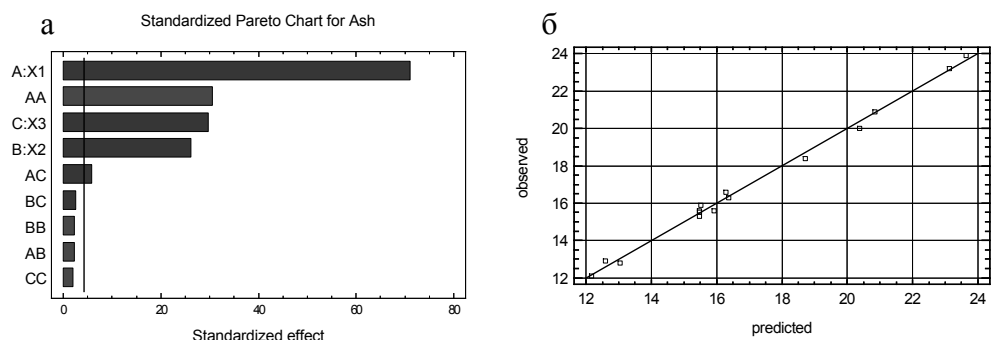


Рис.1- Характеристики регресійної моделі

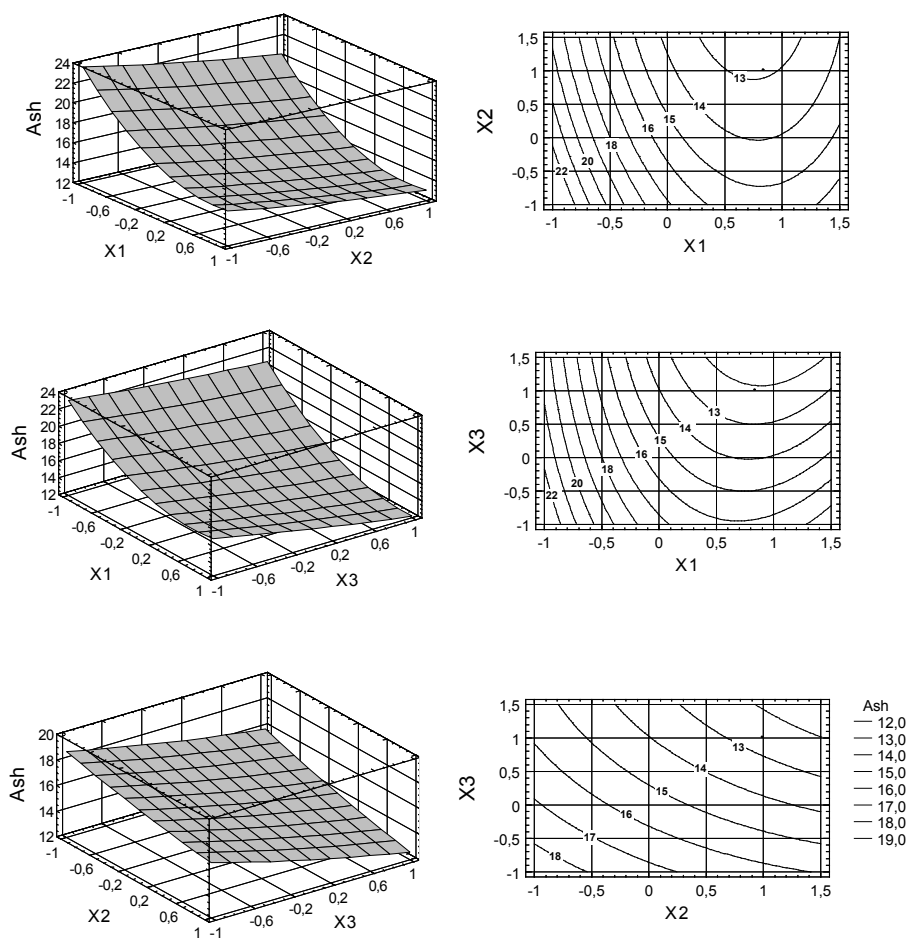


Рис.2-Тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції та їх контурні криві .

Рис.1. Характеристики регресійної моделі

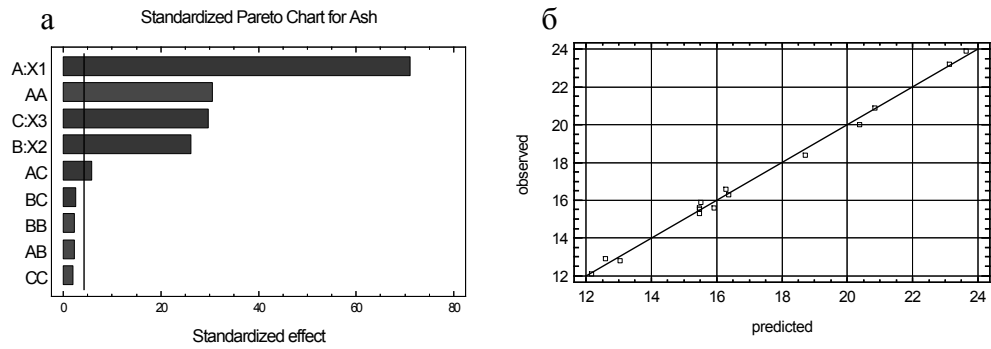


Рис.1- Характеристики регресійної моделі

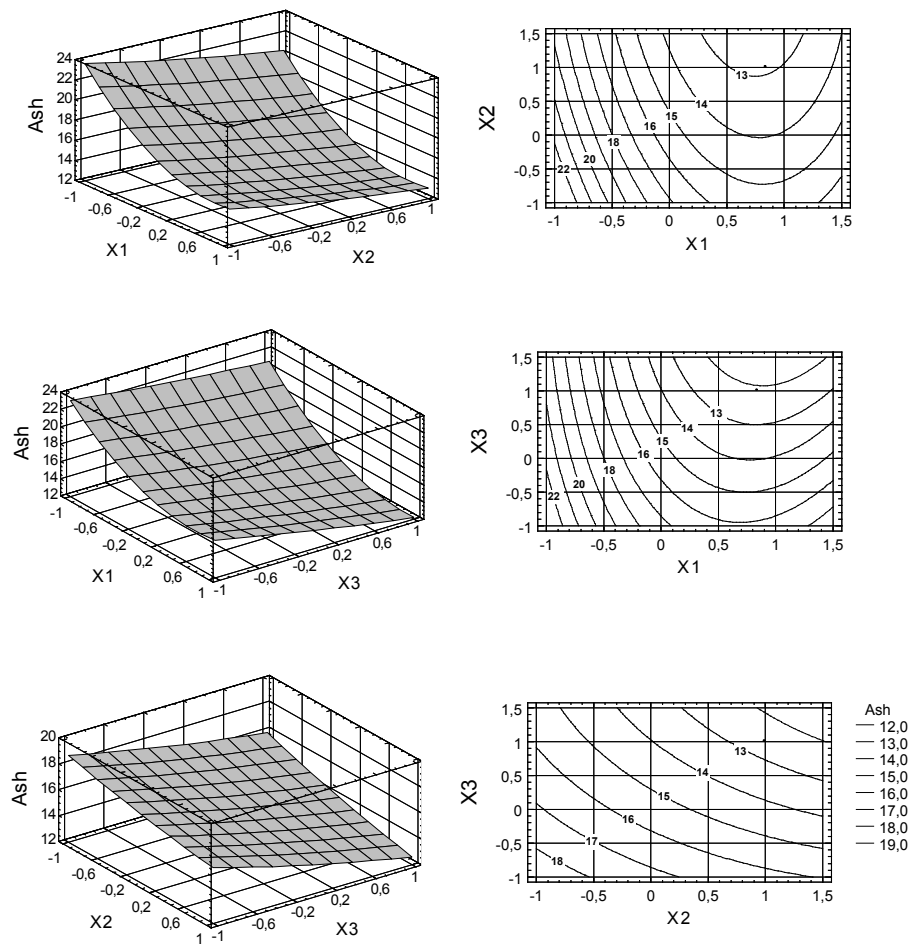


Рис.2-Тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції та їх контурні криві.

Рис.2. Тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції та їх контурні криві

Фактори  $X_2$ ,  $X_3$  практично рівнозначні за своїм впливом на цільову

функцію. На контурних кривих (рис. 2) точками показані оптимальні значення факторів  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ , що відповідають мінімальному значенню зольності концентрата.

Значення факторів, що відповідають оптимуму ( $A_k^d = 10,85\%$ ), у кодованому і натуральному вираженні подані в таблиці 2.

Таблиця 2

Фактор	Low	High	Оптимальне значення	
			кодоване	натуральне
$X_1$	-1,0	1,0	0,843772	2,1%
$X_2$	-1,0	1,0	1,0	5400 м
$X_3$	-1,0	1,0	0,999135	50%

Зольність відходів селективної масляної агрегації складала 69–76%.

Одержані результати дозволяють зробити такі висновки.

1. Суміщений процес "Селективна масляна агрегація – гідротранспорт вугілля" дозволяє ефективно збагачувати тонкодисперсні фракції шламів коксівного вугілля з одержанням відносно низькозольних концентратів, які можуть бути присаджені до шихти.

2. Мінімальне значення зольності концентрату одержують при витратах реагента порядку 2%, дальності гідравлічного транспортування 5,5 км і концентрації гідросуміші 50%.

### Список літератури

1. Федоров В.И., Кучеренко И.П., Золотко А.А. Состояние и проблема развития углеобогащения Украины// Уголь Украины. – 1999. – № 8. – С. 13–17.
2. Білецький В.С., Сергєєв П.В., Папушин Ю.Л. Теорія і практика селективної масляної агрегації вугілля. – Донецьк: Грань. – 1996. – 264 с.
3. Харада Т., Мацуо Т. Агломерація у рідинах// Ніхон Когьо Кайсі. – 1982. – № 1134. – С. 714–722.
4. Налимов В.В., Голикова Т.И. Логические основания планирования эксперимента. - М.: Металлургия, 1981. – 152 с.

© Білецький В.С., Сергєєв П.В., Протасов Ю.О., 2005

*Надійшла до редколегії 20.04.2005 р.*

*Рекомендовано до публікації д.т.н. О.Д. Полуляхом*

УДК 622.794:537.528

**А.А. БЕРЕЗНЯК**, канд. техн. наук  
(Україна, Днепропетровск, Национальный горный университет)

**Д.П. БУРТОВОЙ**, канд. техн. наук,  
**Д.Ю. ХОХУЛЯ**  
(Украина, Днепропетровск, ООО "Веполь")

## **ВОССТАНОВЛЕНИЕ СЫПУЧЕСТИ СМЕРЗШИХСЯ НАСЫПНЫХ ГРУЗОВ**

При транспортировке вагонами влажных насыпных грузов при низких температурах они смерзаются, что вызывает проблемы при разгрузке железнодорожных вагонов.

Стоимость выгрузки смерзшихся насыпных грузов из вагонов по сравнению с теплым периодом года возрастает в 3–6 раз, простои вагонов увеличиваются в 20–30 раз, а производительность труда снижается в 4–9 раз [1].

Анализ перевозок смерзшихся насыпных грузов по железным дорогам Украины и Урала [2,3] показал, что прочность смерзшейся железной руды увеличивается при одной и той же влажности с понижением температуры и при одной и той же температуре с повышением влагосодержания.

В настоящее время для преодоления этого состояния насыпных грузов применяются профилактические способы, сохраняющие сыпучесть грузов во время перевозок (обезвоживание, добавление негашеной извести, соли, опилок и т.п.), и способы восстановления сыпучести в пунктах выгрузки. Профилактические способы – дорогостоящие, требуют материальных затрат и не обеспечивают полной сыпучести насыпных грузов при отрицательных температурах.

Основным средством восстановления сыпучести смерзшихся насыпных грузов в пунктах их выгрузки являются тепляки – капитальные, дорогостоящие сооружения, расходующие огромные количества природного газа при чрезвычайно низком КПД.

Разморозка смерзшихся насыпных грузов в тепляках длится от 4 до 24 часов, но существенный их недостаток – это возможность порчи автотормозного оборудования вагонов, соединительных рукавов, неполное размораживание при низких температурах.

Размораживание смерзшихся насыпных грузов в тепляках осуществляется за счет фазового перехода льда в жидкость. Провести полный анализ затрат энергии, необходимой для разморозки, не представляется возможным, так как смерзшиеся насыпные грузы являются сложными, многокомпонентными и многофазными физико-химическими системами [4]. Они содержат минеральный скелет и воду в трех фазах (твердой, жидкой и газообразной), с различными теплофизическими параметрами.

Эти обстоятельства приводят к существенным экономическим потерям,

которые, по данным АО ММК им. Ильича, в аварийных ситуациях превышали 8 млн. гривен в сутки. В связи с этим были проведены испытания для определения возможности восстановления сыпучести смерзшихся насыпных грузов при выгрузке их из железнодорожных вагонов с помощью энергии микроволнового электромагнитного поля.

Физические предпосылки микроволнового восстановления сыпучести смерзшихся насыпных грузов заключаются в том, что электромагнитная энергия по-разному поглощается различными веществами.

Энергия микроволнового электромагнитного поля диссипирует в смерзшихся насыпных грузах с плотностью мощности, Вт/м<sup>3</sup>, [5]

$$\rho_E = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r \cdot \operatorname{tg}\delta \cdot f \cdot E^2,$$

где  $\epsilon_0=8,85\cdot 10^{-12}$  – электрическая постоянная, Ф/м;  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость смерзшихся насыпных грузов;  $\operatorname{tg}\delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь;  $f$  – частота колебаний электромагнитного поля, Гц;  $E$  – напряженность электрического поля, В/м.

Диссипация электромагнитного поля (преобразование электрической энергии в другие виды) создает не только в смерзшихся насыпных грузах распределенные источники тепла, характеризующиеся величиной тангенса угла диэлектрических потерь, но и локальные адгезионные давления

$$P_{Ei} = 0,5\epsilon_{ri}\epsilon_0 E^2,$$

где  $P_{Ei}$  – адгезионное давление на поверхности  $i$ -го компонента, Па;  $\epsilon_{ri}$  – относительная диэлектрическая проницаемость  $i$ -го компонента смерзшихся насыпных грузов.

Кроме того, наличие электрического поля в смерзшихся насыпных грузах приводит к локальной электрострикции, т. е. объемной относительной деформации компонентов насыпных грузов, величина которой зависит от плотности и относительной диэлектрической проницаемости  $i$ -го компонента:

$$d_i = \frac{\Delta V_i}{V_i} = \frac{\beta_i}{2\pi} \rho_i \epsilon_0 \frac{d\epsilon_{ri}}{d\rho_i} E^2,$$

где  $d_i$  – величина деформации, м;  $\Delta V_i$  и  $V_i$  – изменение объема и объем компонента, м<sup>3</sup>;  $\beta_i$  – сжимаемость компонентов смерзшихся насыпных



грузов, Па<sup>-1</sup>;  $\rho_i$  – плотность компонента, кг/м<sup>3</sup>.

Напряженность электрической составляющей вследствие диссипации энергии электромагнитного поля убывает по мере его проникновения вглубь смерзшихся насыпных грузов. Для характеристики этого явления вводится понятие глубины проникновения поля:

$$L = \frac{\lambda}{2\pi} \left[ \frac{\varepsilon_r}{2} \left( \sqrt{1 + tg^2 \delta} - 1 \right) \right]^{-0,5},$$

где  $L$  – глубина проникновения поля, м;  $\lambda$  – длина волны электромагнитного поля в смерзшемся насыпном грузе, м.

Представленные теоретические соотношения использовались многими авторами [5–8] при исследовании разупрочнения и нагрева смерзшихся насыпных грузов.

Основное внимание уделялось экспериментальному определению зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры, влагосодержания и плотности для различных дисперсных материалов, которые транспортируются в железнодорожных вагонах.

Полученные данные позволяют определить значения характеристик электромагнитного поля для применения вышеприведенных формул в процессах восстановления сыпучести смерзшихся насыпных грузов.

Разрабатываемые источники микроволнового электромагнитного поля высоких уровней мощности нашли широкое применение в многотоннажных технологических установках мощностью от 5 до 500 кВт [9].

Международной организацией радиокommunikаций (ISM) для этих целей установлены частота колебаний электромагнитного поля (460, 915 и 2450 МГц) и нормы допустимых утечек микроволновой энергии (не более 0,5 Вт/(м<sup>2</sup> ч)) на рабочих местах обслуживающего персонала.

Авторами статьи проведены работы [10] по восстановлению сыпучести смерзшихся насыпных грузов на образцах, представленных АО ММК им. Ильича.

Для исследования процесса выгрузки смерзшихся концентратов с применением микроволнового электромагнитного поля была использована экспериментальная лабораторная установка НПП "Веполь", блок-схема которой приведена на рисунке.

## Спеціальні та комбіновані методи

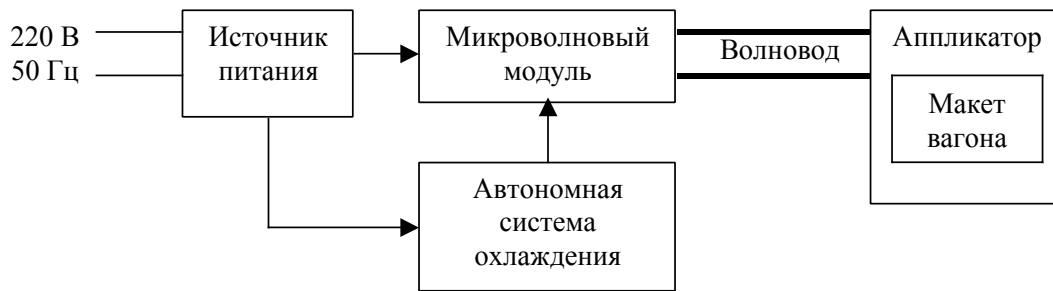


Рис. Блок-схема экспериментальной установки.

Блок-схема экспериментальной установки

В качестве источника микроволновой энергии использовался магнетронный генератор, обеспечивающий на выходе постоянную мощность (1 кВт) на частоте 2450 МГц. Энергия микроволнового электромагнитного поля по волноводу сечением  $90 \times 45 \text{ мм}^2$  подавалась в камеру (аппликатор) с размерами  $3,5 \times 3,4 \times 2,5 \text{ дм}^3$  и объемом  $29,75 \text{ дм}^3$ . Макет железнодорожного вагона выполнен из листовой стали толщиной 2 мм. Размеры макета  $3,0 \times 0,9 \times 0,8 \text{ дм}^3$ , объем  $2,16 \text{ дм}^3$ . Плотность микроволновой мощности по сечению камеры равнялась  $84 \text{ Вт/дм}^2$  (погрешность равномерности ее распределения не превышала 5–7%) и вычислялась по формуле:

$$p_s = \frac{P_g}{S_k},$$

где  $p_s$  – плотность микроволновой мощности,  $\text{Вт/м}^2$ ;  $P_g$  – выходная мощность генератора, Вт;  $S_k$  – площадь сечения аппликатора, перпендикулярная падающему излучению,  $\text{м}^2$ .

Мощность, поступающая в макет вагона через его открытую верхнюю крышку площадью  $2,7 \text{ дм}^2$ , составляла 227 Вт и определялась как

$$P_c = p_s S_c,$$

где  $S_c$  – площадь открытой стороны модели,  $\text{м}^2$ .

Эксперименты проводились по следующей методике. Проба влажного концентрата высушивалась в сушильном шкафу при температуре  $105^\circ\text{C}$  до постоянного веса, а затем определялось ее начальное влагосодержание в процентах. Усредненное по шести экспериментам значение начального

влагосодержания концентрата равнялось 7%. Для взвешивания использовались аналитические лабораторные весы с точностью взвешивания 0,1 г.

После этого в макет вагона помещался сухой концентрат массой 2 кг с послойным увлажнением водой в количестве 0,14 кг (посредством распылителя) до начального влагосодержания. Макет с влажным концентратом закрывался крышкой, термоизолировался по всей поверхности, отстаивался 4,5 часа для получения равномерного распределения влаги по объему, после чего помещался в морозильный шкаф с температурой  $-12,5^{\circ}\text{C}$  на время 25 ч. При таких условиях концентрат промерзал по всему объему до температуры камеры (скорость промерзания составила 0,4 см/ч).

Затем макет вагона со снятой верхней крышкой располагался в аппликаторе днищем вверх под наклоном около  $50^{\circ}$  и включался микроволновый генератор. Через 15 с концентрат начал высыпаться, и через 32 с макет вагона полностью разгрузился. При этом сыпучесть смерзшегося концентрата восстановилась полностью без фазового перехода льда в жидкость с незначительным изменением температуры (температура концентрата осталась отрицательной). Полученные экспериментальные результаты позволяют оценить энергозатраты на восстановление сыпучести железорудного концентрата.

Удельные затраты микроволновой энергии следующие:

$$\mathcal{E}_y = \frac{P_{\text{с}} t}{M_0} = \frac{227 \cdot 32}{3,6 \cdot 2,14} = 0,943, \quad \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{кг}},$$

где  $M_0$  – вес влажного материала, кг;  $t$  – время восстановления сыпучести, с.

Интенсивность восстановления сыпучести, определяемая как отношение удельных затрат микроволновой энергии к величине отрицательной температуры составила  $0,943/12,5 = 0,0754 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$ .

Для образцов железорудного концентрата Лебединского ГОКа аналогичные эксперименты показали, что восстановление сыпучести происходит при затратах МВ энергии в 5-7 раз меньших, чем в случае концентрата ИнГОКа. Кроме того, дополнительно определялись энергозатраты на нагревание железорудного концентрата ИнГОКа на той же установке. Образец был нагрет до температуры  $80^{\circ}\text{C}$  за 2 мин. При этом удельные энергозатраты составили  $15,576 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{кг}$  при интенсивности нагрева  $0,1946 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$ .

Полученные экспериментальные результаты зафиксированы соответствующим актом ОАО ММК им. Ильича.

### Список литературы

1. С.Ф.Маталасов, Я.М. Куржуков, А.С. Хоружий, и др. Борьба со смерзаемостью металлургического сырья при перевозке по железным дорогам. – М.: Металлургия, 1974. – 248 с.
2. Кожевников Н.Н., Попов В.И. Прогнозирование процессов промерзания в сыпучих материалах при железнодорожных перевозках. – Новосибирск: Наука, 1978. – 104 с.
3. Маталасов С.Ф., Носков Ю.А. Совершенствование перевозок смерзающихся навалочных грузов // Железнодорожный транспорт. – 1965. – №1. – С. 27–29.
4. Иванов Н.С., Гаврильев Р.М. Теплофизические свойства мерзлых горных пород. – М.: Наука, 1965. – 74 с.
5. Пархоменко Э.И. Электрофизические свойства горных пород. – М.: Наука, 1965. – 164 с.
6. Рекинглаз Л.Э., Шонин О.Б., Хоминский В.А. Экспериментальное исследование прочности мерзлых пород в СВЧ электромагнитном поле // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1980. – №3. – С. 47–51.
7. Шонин О.Б., Соколова Н.В. Электрические свойства мерзлых пород в СВЧ – диапазоне // Физические процессы горного производства. – 1981. – №9. – С. 48–52.
8. Линник Ю.М. Основы разупрочнения мерзлых пород СВЧ – полями. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. – 212 с.
9. Применение микроволновых электромагнитных полей в энергосберегающих и новых промышленных технологиях / Буртовой Д.П., Грачев К.Г., Хохуля Д.Ю., и др. // Металлургия и горнорудная промышленность. – 2002. – №4. – С. 104–108.
10. Пат. №66022 Украина. Способ восстановления сыпучести смерзающихся материалов / Д.П. Буртовой, А.А. Березняк, Д.Ю. Хохуля и др. // Открытия изобретения. – 2004. – №4. – С. 24–28.

© Березняк А.А., Буртовой Д.П., Хохуля Д.Ю., 2005

*Надійшла до редколегії 20.04.2005 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. О.Д. Полуляхом*

УДК

**В.М. АЖАЖА, А.Ф. БОЛКОВ, Г.П. БРЕХАРЯ, Ю.Ф. КОРОВИН,  
А.П. МУХАЧЕВ, Е.А. ХАРИТОНОВА**

Национальный научный центр "ХФТИ" НАН Украины, Национальный горный университет,  
Запорожский государственный университет

### **ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАГНИТОВ В УКРАИНЕ**

Высокоэнергетические магниты неодим-железо-бор импортируются в Украину из Китая, где организовано их производство на базе собственных полиметаллических руд. В то же время Украина до 1991 г. имела свое промышленное производство концентратов редкоземельных элементов (РЗЭ)

на

ПО "Приднепровский химический завод" (ПО "ПХЗ"), г. Днепродзержинск. В качестве сырья были использованы полиметаллические руды, которые перерабатывали по азотнокислой сорбционно-экстракционной технологии с получением концентратов редкоземельных элементов легкой и среднетяжелой групп, служивших исходным сырьем для производства магнитов.

В связи с увеличением темпов роста промышленности в Украине складываются благоприятные экономические условия для развития редкометальной промышленности, в том числе, высокоэнергетических постоянных магнитов.

В данной работе проведена оценка возможности получения концентратов РЗЭ легкой группы из полиметаллических руд различного состава и техногенного сырья (фосфогипса).

### *Технология переработки лопаритового концентрата*

Основной источник доступного редкоземельного сырья – лопаритовый концентрат с содержанием редкоземельных металлов (РЗМ) более 30%, переработка которого освоена в России на базе Соликамского магниевого завода, а разделение РЗМ – на Пышминском опытном заводе. Особенностью сырья является наличие в нем радиоактивного элемента тория, требующего обязательного полного его выделения и захоронения. Состав лопаритового концентрата приведен в табл. 1. Вскрытие сырья проводится с использованием хлора, что создает серьезные экологические проблемы в части утилизации его соединений.

*Таблица 1*

Компты	TiO <sub>2</sub>	ΣРЗМ	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	Th	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
%	39,4	32...34	8–10	0,6–0,72	4,5–5	7–9	0,5...0,6	1,9	2,5	0,09

Азотнокислая технология в экологическом плане предпочтительнее хлорной, что и доказано многолетней практикой переработки урановых, фосфорсодержащих и цирконовых концентратов на ПО "ПХЗ", так как нитрат-ион утилизировали в производстве минеральных удобрений или солей, выпуск которых существенно снижал себестоимость основной продукции. Опытно-промышленные испытания переработки лопаритового концентрата проводили гидрометаллургическим способом по технологии, приведенной на рис. 1.

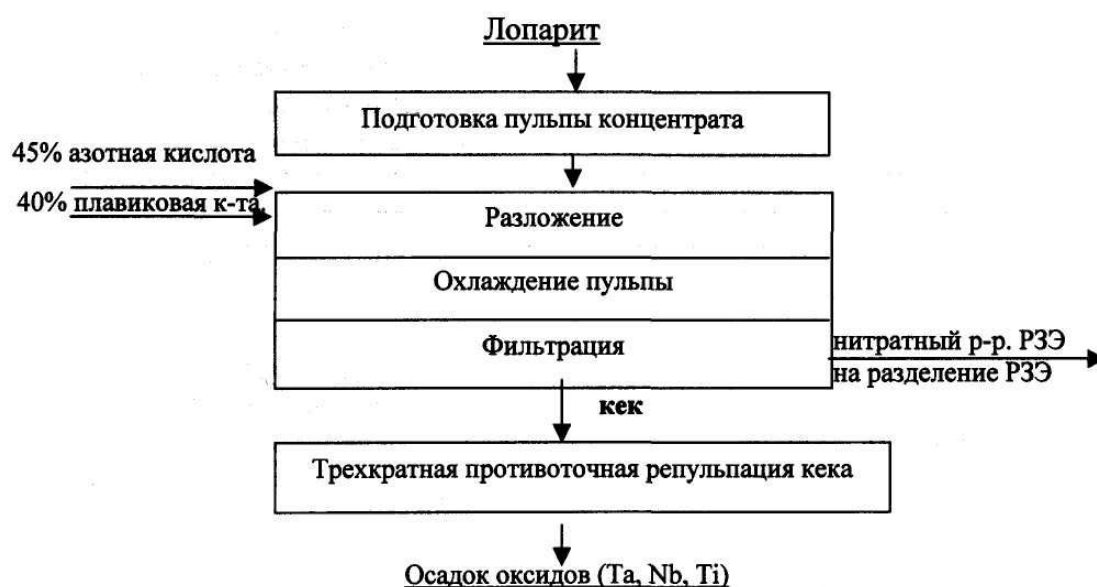


Рис. 1. Технологическая схема переработки лопарита

Основной метод очистки РЗМ от Th – его соосаждение с железосодержащим осадком. После экстракционной очистки редкоземельных элементов от остальных примесей был получен концентрат, состав которого – в табл. 2.

Таблица 2

Элемент	%	Элемент	%	Элемент	%
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,0	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,7	Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	0,05
CeO <sub>2</sub>	52,0	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	5,8	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,003
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,05	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,0	HO <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,046
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,147	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,27	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,076
Tu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,008	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0015		

Данная технологическая схема малоотходная и не требует применения хлора, жидкие стоки которого нуждаются в специальных мерах утилизации.

### Технология переработки фосфоритов

Известно, что редкоземельные элементы могут находиться и в составе урансодержащих фосфоритов, переработка которых описана в работах [2,3,4], по принципиальной технологической схеме (рис. 2). В основе их переработки лежит азотнокислое-сернокислое вскрытие с перевода целевых компонентов в раствор, осаждение части кальция в виде гипса, поэтапное их разделение и извлечение, утилизация азотно-фосфорсодержащих растворов в виде минеральных удобрений.

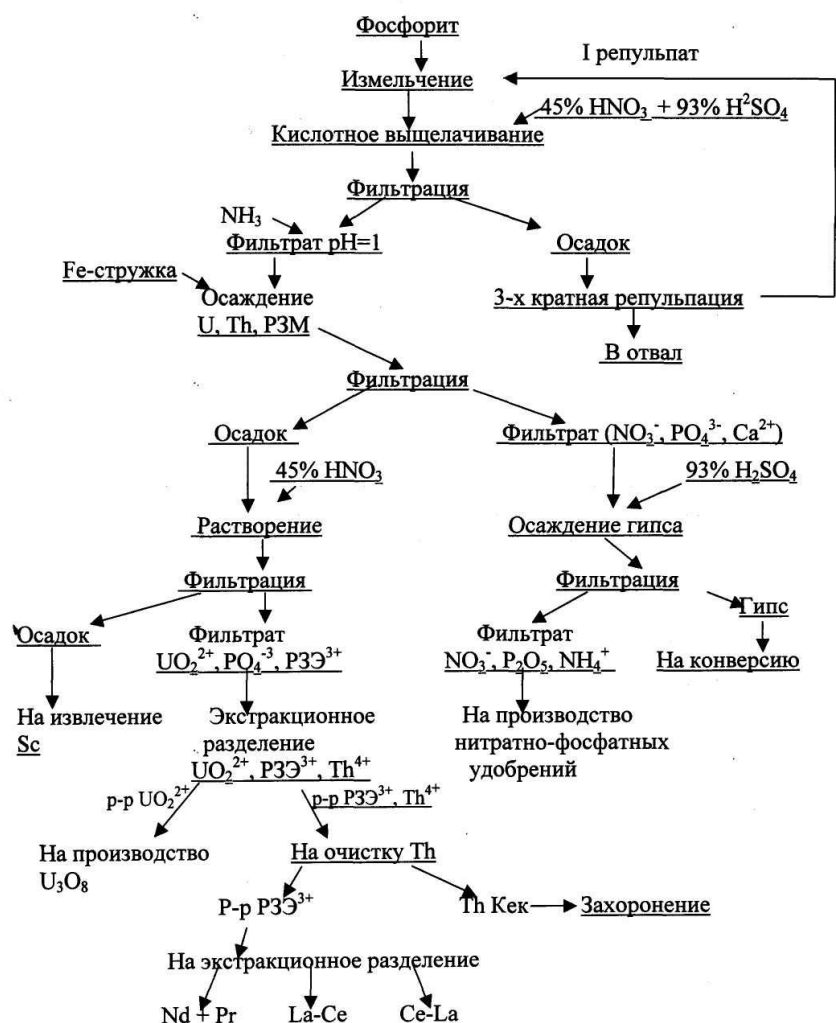


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема переработки фосфоритов

Состав редкоземельного концентрата легкой группы (РЗК), выделенного из фосфоритов, методами ионного обмена и жидкостной экстракции дан в табл. 3.

Таблица 3

Элемент	%	Элемент	%	Элемент	%
La2O3	20–25	Nd2O3	17,0	Pr6O11	1,9
Ce2O3	50–55	Sm2O3	1,1	Eu2O3	1,0
Y2O3	3,5	Gd2O3	0,7	Dy2O3	0,5

Содержание железа и алюминия в концентрате РЗМ не регламентируется, так как эти элементы вводятся в состав тройного сплава для производства магнитов.

### Технология переработки фосфогипса

Перспективным материалом в Украине для извлечения РЗМ является

фосфогипс, техногенные месторождения которого составляют до 60,0 млн тонн. При сернокислом вскрытии апатитовых концентратов более 80% РЗМ переходят в фосфогипс и безвозвратно теряются в складированных отвалах, занимая большие территории. Комплексная переработка апатита и фосфогипса детально изучена в работах [5, 6].

В отвалах производства минеральных удобрений бывшего ПО "ПХЗ" накоплено 7,0 млн тонн фосфогипса с содержанием РЗЭ до 0,3%. Принципиальная схема переработки фосфогипса для извлечения РЗЭ с применением сорбционных технологий представлена на рис. 3. Данная технология позволяет утилизировать азотную кислоту и аммиак в производстве удобрений, а также использовать фосфогипс в качестве строительного материала. Извлечение РЗЭ составляет 40–50%.

Промышленные испытания технологии переработки фосфогипса полностью подтвердили возможность его комплексной переработки с применением современных методов гидрометаллургии: конверсии, ионного обмена и экстракции.

Таким образом, в представленных технологиях переработки комплексных полиметаллических руд, содержащих редкие и редкоземельные металлы, был использован ряд оригинальных приемов. Так, в качестве вскрывающего реагента брали азотную кислоту, что в дальнейшем позволило практически полностью утилизировать растворы для производства натриевой селитры и минеральных удобрений. Практический интерес представляет и опыт переработки лопаритового концентрата, содержащего в отличие от фосфоритов до 34% РЗМ. Традиционная технология его переработки, принятая в ряде стран, основана на экологически вредном хлорном методе вскрытия.

С позиции развития современных отраслей промышленности Украины прогноз уровня потребления редкоземельной продукции еще предстоит сделать, но несомненно он будет оптимистичным. Особенно это касается неодима, лантана и церия. Прогнозируется и реально наблюдается устойчивый спрос на индивидуальные редкоземельные металлы – неодим, самарий, европий, эрбий, тербий, иттрий, гадолиний.



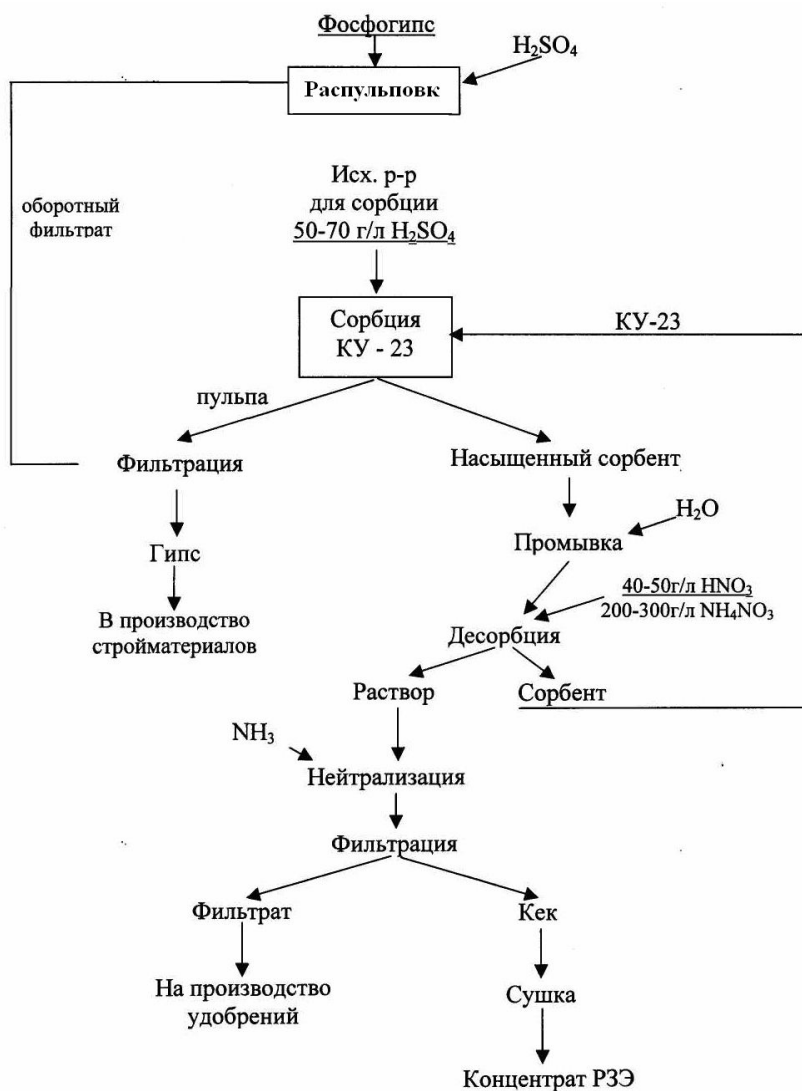


Рис. 3. Технологическая схема извлечения РЗЭ из фосфогипса

## Список литературы

1. Current state of world NdFeB magnet industry / Y. Luo // Proc. Int. Conf . “High Performance Magnets and Their Application”, France, 2004. – P. 28 – 40.
2. W.L. Lenneman Eng / Min Yourn 157. №6a 122 (1956).
3. D.F. Lillie, R. Tremblay, Can.Min Met Bull 49 №528, 262 (1956).
4. Вольфович С.И. Общая химическая технология. – М.: Госхимиздат, 1959. – Т.2. –228 с.
5. Лебедев В.Н. Физико-химические и технологические проблемы переработки сырья Кольского полуострова. – М.: Наука, 1993. – 256 с.
6. Лебедев В.Н. Проблемы эффективного использования минерального сырья Кольского полуострова. М.: Апатиты, 1993. – 188 с.

© Ажажа В.М., Болков А.Ф., Брехаря Г.П., Коровин Ю.Ф.,

## **Спеціальні та комбіновані методи**

Мухачев А.П., Харитонova Е.А., 2005

*Надійшла до редколегії 20.04.2005 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*